

Carbone et élevage de ruminants

Lecomte Ph ^{1,3}, Boval M ²., Guerin H ¹., Ickowicz A. ¹ Huguenin J. ¹ Limbourg P. ³

¹CIRAD Elevage Médecine Vétérinaire, Campus de Baillarguet, Cedex 5 Montpellier, F-34398 France

²INRA Antilles-Guyane, Unité de Recherches Zootechniques, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe, France

³CRAGx Section Systèmes Agricoles, 100, rue de serpont, B 6800, Libramont Belgique.

philippe.lecomte@cirad.fr

RÉSUMÉ

Si la digestion chez les ruminants conduit à la formation de CO₂ et CH₄ contribuant à l'effet de serre, elle entraîne surtout le transfert par l'animal de matières carbonées non digérées, généralement enrichies en azote. L'amélioration des prairies tout comme la gestion des effluents sont susceptibles d'augmenter les taux de C dans le sol, contribuant ainsi à améliorer le potentiel de fertilité dans le complexe sol plante du territoire local ; en particulier dans les conditions difficiles des milieux chauds. Dans une tentative de description de la part du compartiment animal et de façon plus générale de la composante "élevage" dans les flux de C découlant des modes de gestion de la biomasse, on peut utilement tirer parti des nombreuses données issues de travaux de recherche conduits en milieux tropicaux et tempérés. Ces exemples fixent des ordres de grandeur et montrent dans le système lié à l'animal les étapes au cours desquelles, les matrices complexes dans lesquelles sont inclus les éléments C et N subissent des transformations à des degrés divers. L'évocation successive des différents compartiments ne permet pas en tant que tel de fermer un cycle complet du C à l'échelle de l'écosystème. Elle montre par contre, tout l'intérêt d'une approche intégrée et les nombreux points sur lesquels, l'éleveur peut intervenir au travers de l'animal et de la conduite de son système pour améliorer l'efficacité des émissions C et N sous différentes formes, contribuer à la séquestration du C, limiter directement ou indirectement la dégradation de la fertilité des sols, voire l'améliorer. Face à la croissance forte des productions de lait et de viande qui se profile dans les pays du sud, et à la nécessité d'en concevoir le développement selon des modalités durables, il apparaît qu'un important travail d'étude mériterait d'être poursuivi sur la diversité des pratiques de conduite du carbone et de l'azote dans les systèmes et sur la représentation de la complexité et des synergies qui découleraient d'une intégration accrue de l'agriculture et de l'élevage. La simulation en modélisation dynamique des effets et impacts potentiels d'une évolution des trajectoires de conduite des systèmes permettrait d'avancer plus rapidement sur toutes ces questions.

Mots clés: *Ruminants, Carbone, Azote, Méthane, effluents, prairies*

ABSTRACT

If ruminant digestion lead to a production of CO₂ and CH₄ contributing to greenhouse effect, it mainly participate to the transfert of important amounts of undigested nitrogen enriched carbohydrates. Pasture improvements as well as manure management are susceptible to incrise carbon levels in the soil contributing to improve the fertility potential in the plant soil complex, particularly in the south harsh environments. In a attempt to describe the animal and more generally the livestock system contribution in the carbon fluxes resulting from the biomass management, one can usefully take opportunity of numerous data's derivate from research works in temperate and tropical environments. The examples ix scales and describes the steps along which complex matrixes in wich C and N are included are transformed at different levels. The evocation of the different compartment does'nt allow to close a complete cycle at the level of the ecosystem. It shows however all the interest of an integrated approach and the numerous points on which the actor may intervene through the animal and the system driving to improve the Carbon and Nitrogen efficiency, to contribute to C sequestration, limit

directly or indirectly the soil fertility degradation or even improve it. Facing the animal productions attended growth in the south and the necessity to conceive for it a sustainable development, an important research work should be forwarded on the diversity of the practices of C & N management and on the complexity representation as well as of the synergies that could evolve from a better integration of crop and livestock. The dynamic modelling of the effects and impacts of the evolution of the system driving trajectories could be of great help to progress rapidly on all these questions.

Key words: *Ruminants, Carbon, Nitrogen, Methane, Manure, Grasslands.*

INTRODUCTION

La mise en questionnement des facteurs qui contribuent à l'augmentation de l'effet de serre renouvellent l'intérêt pour l'étude des flux de carbone dans les écosystèmes. L'animal et en particulier les ruminants détiennent un rôle non négligeable dans les transferts de cet élément majeur.

Répartis ($>1.5 \cdot 10^9$ têtes; FAOSTAT, 2002) dans la plupart des écosystèmes anthropisés de la planète, les ruminants domestiques fermentent et ensuite digèrent partiellement les hydrates de carbone de végétations herbacées à valeur marginale et/ou de produits dérivés de l'agriculture. En métabolisant les nutriments digérés, ils élaborent des produits à haute valeur biologique ajoutée telles que le lait ou la viande. Dans nombre d'agro-systèmes, ils contribuent également à la production de fumure, de travail et sont un facteur de capital.

Dans la transformation du carbone de la MO, la digestion conduit effectivement à une production importante de co-produits carbonés gazeux (CO_2 , CH_4) contribuant, en partie, à l'effet de serre. Elle entraîne aussi et surtout le transfert d'hydrates de carbone non digérés, généralement enrichis en azote par l'animal. Par ailleurs, dans les systèmes de conduite de l'élevage, l'amélioration des prairies, tout comme la gestion des effluents animaux, sont également susceptibles de faire évoluer les taux de C dans le sol. Tout en stockant du carbone, cela contribue aussi à augmenter le potentiel de fertilité dans le complexe sol-plante du territoire local. C'est particulièrement le cas dans les conditions difficiles des milieux chauds.

Dans toute la complexité du cycle du carbone et des mécanismes qui y participent, on ne peut que difficilement aborder l'ensemble des questions relatives à la place de l'animal. C'est d'autant plus complexe que l'alimentation étant au cœur de la relation entre l'animal et la ressource, on ne peut dissocier le carbone de cet autre élément majeur qu'est l'azote qui entre dans l'élaboration des protéines.

Les enjeux quant à une meilleure appréhension globale des mécanismes, sont cependant de taille. Face à une demande mondiale pour laquelle on prévoit une forte expansion, les productions animales sont appelées à un développement très important dans l'avenir proche, tout particulièrement dans les pays du Sud.

L'animal aura des implications inévitables dans la conduite intégrée et durable des éco agro systèmes de demain et les effets sur les transferts de C demandent à être mieux appréhendés voire maîtrisés.

En s'attachant à dégager une vision systémique, à défaut de données expérimentales qui soient réellement ciblées sur le sujet et qui permettent de décrire de manière holistique toute la complexité sur un site bien établi, on ne peut que s'appuyer sur des exemples et références expérimentales d'origine diverses. Pour tenter de répondre à la demande des organisateurs du colloque, la communication tente ainsi, de façon certes incomplète, mais en mettant autant que possible l'accent sur des données en situations du Sud, d'agréger un ensemble préliminaire d'éléments descriptifs. Ils permettent d'établir des constats quant au devenir du C et du N qui transitent dans les différents compartiments plante, animal, sol de systèmes de production où interviennent des ruminants.

DECRIRE LES FLUX ET LES INTERACTIONS LIEES A L'ELEVAGE DE RUMINANTS

Dans une tentative de description de la part du compartiment animal et de façon plus générale de la composante "élevage de ruminants" dans les flux de C découlant des modes de gestion de la biomasse, sans vouloir être exhaustif, on peut utilement tirer parti des nombreuses données issues d'études réalisées en milieux tropicaux et tempérés.

Au plan de la description de la ressource et de son utilisation par l'animal, dans les travaux qui ont été conduits sur l'alimentation des ruminants, les données de composition intrinsèque de la matière disponible, réellement ingérée et déféquée par les animaux que l'on collecte classiquement, conduisent à l'établissement de bilans de valeur alimentaire des ressources. Ce sont des références utiles. Associées à des modèles de prédiction des éléments C et N de la matière aux différentes étapes, elles permettent d'aborder la description des ressources et de leur devenir ainsi que l'établissement de bilans C et N instantané sur les compartiments ressources et animal.

Les études et suivis de systèmes d'alimentation des troupeaux produisent par ailleurs, des données de bilans saisonniers de masses et de qualités de ressources disponibles, de charges animales sur les superficies du terroir, ainsi que des descriptions des pratiques saisonnières de conduite des animaux vis à vis de la ressource. Revisitées sous l'angle du devenir du carbone et de l'azote ce sont également des sources d'information intéressantes.

La production d'effluents et en particulier leur traitement dans une perspective de recyclage en tant que matières organiques fertilisantes en prairies ; tout comme l'introduction d'espèces prairiales améliorantes dans les végétations naturelles, font également partie intégrante du système de production animale. Ces aspects ont fait l'objet de suivis qui, indirectement, permettent de situer les quantités de carbone et d'azote mises en jeu ainsi que leur devenir au cours du temps.

Pour appuyer une démarche descriptive on se référera ici aux bases de données mises à disposition par les chercheurs et institutions que sont : la station INRA de Petit Bourg en Guadeloupe, (Boval *et al.*, 2002), le CIRAD Elevage et Médecine Vétérinaire et l'Institut Sénégalais de la Recherche Agricole à Dakar (Guérin *et al.*, 1990) et à Saré Yero Bana (Ickowicz, 2002) au Sénégal pour ce qui est de la caractérisation de la ressource et de l'utilisation alimentaire par l'animal ; la Faculté des Sciences Agronomiques et le Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux dans le suivi des végétations du ranch de l'Adélé (Togo) (Lecomte, 1995) et dans le suivi du devenir de prairies fertilisées en compost (Limbourg, 2001) en milieu tempéré ; enfin le Cirad Emvt en Guyane dans les élevages de la Scebog (Huguenin, 1997) lors du suivi de végétations améliorées par l'introduction d'espèces exotiques.

RESSOURCES ALIMENTAIRES VÉGÉTALES ET CARBONE

Parmi un large ensemble de ressources utilisables par l'animal en régions tropicales, lorsque l'on s'adresse à des végétations de graminées cultivées (*Dicanthium sp.*, *Digitaria sp.*), exploitées au long de cycles de repousses allant de 3 à 10 semaines (Boval *et al.*, 2003), la composition en carbone de l'ingéré par l'animal, varie relativement peu et oscille entre des valeurs qui vont de 40 à 44 (%MS). A mesure de la croissance de la plante, l'azote se dilue, (Figure 1) la plante élabore de plus en plus de parois cellulologiques qui tendent à se lignifier, le taux de C reste cependant dans une gamme assez étroite. Selon la phénologie de la graminée cette évolution de la composition en C et N peut être plus ou moins rapide et accentuée. Dans l'expression de cet indicateur classiquement utilisé en sciences du sol et qui traduit la qualité générale de la MO dans le rapport entre le carbone et l'azote, les valeurs C/N oscillent entre 15 et 35.

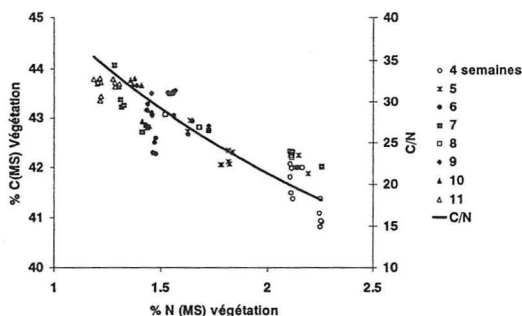


Figure 1. Evolution des taux de carbone et d'azote et du C/N de l'ingéré animal au cours de la croissance de deux graminées cultivées. (données Boval, 2002)

Lorsque l'on observe la composition des végétaux dans les faciès dérivés de l'association naturelle à *H. diandra* – *P. phragmitoides* en savane soudano-guinéenne (Lecomte, 1995), les taux de carbone sont assez similaires. Limitées par les conditions de sol les teneurs en azote sont par contre généralement plus basses (Figure 2). Cela conduit pour les herbages naturels à des valeurs de C/N (moyenne = 44) oscillant entre 20 pour les jeunes repousses après feux qui seront celles, les plus appréciées par les animaux jusqu'à 100 pour des biomasses de fin de cycle, pauvres en azote et de faibles valeurs alimentaires.

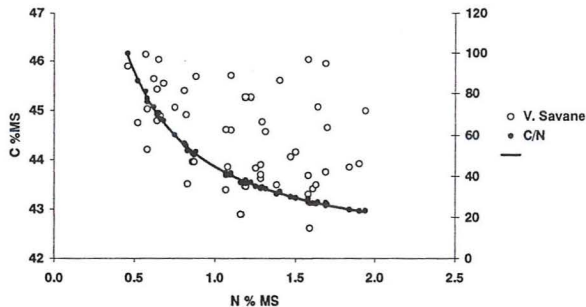


Figure 2 Teneurs en carbone et azote de végétations naturelles de savane. (données Lecomte, 1995)

En évoluant vers ce qui correspondrait à des systèmes de production plus élaborés, dans lesquels on complémente les animaux en énergie et protéines à partir de ressources locales, les bases de données (Guerin *et al.* 1990, 1996) caractérisant des rations mixtes testées sur ovins et caprins sont un référentiel utile. L'ingéré à base de pailles et de compléments allant des tourteaux agroindustriels jusqu'aux feuilles de ligneux, présente des valeurs de teneur en carbone qui vont de 30 à 50 %. Soit une plage de variation nettement plus large, selon la nature des constituants peu cellulotiques ou au contraire fortement lignifiés qui entraînent dans la ration. Les teneurs en azote, d'une manière générale plus élevées, varient selon la nature et l'apport de ressources protéiques dans la ration (Figure 3). Dans le cas des rations complémentées, le C/N des ressources auxquelles l'animal peut avoir accès est ainsi susceptible d'évoluer entre 12 et 38.

Tableau 1 Valeurs moyennes et coefficients de variation des teneurs en C et N (%MS) et du C/N de ressources en milieu tropical

	C	N	C/N
Fourrages cultivés	42.75	1.69	26.59
(Guadeloupe)	1.8	21.7	22.3
Végétation naturelle	44.52	1.16	44.86
(Togo)	2.1	36.0	43.7
Rations mixtes	40.60	2.00	20.80
(Sénégal)	7.8	16.9	17.0

On voit ainsi que les teneurs en C sont assez constantes dans le cas des fourrages seuls. Lorsque l'on incorpore des sous produits, la plage de valeurs s'étend. Les variations sur la teneur en N sont nettement plus importantes. Les types de constituants dans lesquels le carbone est inclus, principalement l'amidon et les fibres (hémicelluloses, cellulose et lignine), sont cependant très diverses et variables quant à la proportion et ne sont pas uniformément dégradables, il en va de même pour l'azote. Cela aura bien évidemment un impact sur l'utilisation digestive qu'en aura l'animal.

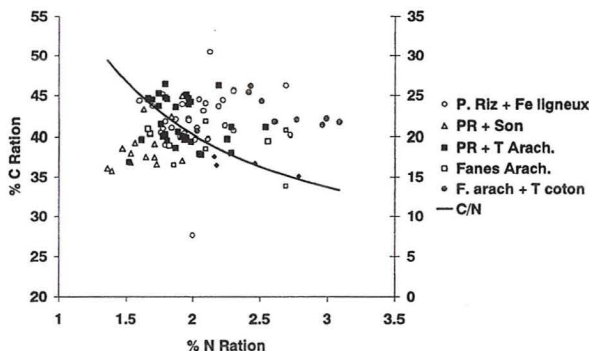


Figure 3 Teneurs en carbone et azote de rations mixtes distribuées à des petits ruminants.

INGESTION ET DIGESTION DE CARBONE ET AZOTE

Ingestion de carbone et productions digestives de C gazeux

Selon les données issues des bilans de digestibilité et les modèles évoqués précédemment¹, en conditions tropicales, l'ovin standard de 30 kg (Guérin *et al.*, 1990) et le bovin standard de 250 kg (Boval *et al.*, 2003) alimentés *ad libitum*, ingéreraient respectivement de 0.16 à 0.33 kg C j⁻¹ et de 1.8 à 2.7 kg C j⁻¹. A capacité d'ingestion de matière sèche équivalente pour une même espèce, cette amplitude de variation est principalement liée à l'ingestibilité du fourrage qui décroît lorsqu'il évolue en âge et devient moins digestible.

Au cours du transit digestif, les microorganismes fermentent l'aliment, principalement dans le rumen, pour produire l'énergie et l'ammoniac qui leur permet ensuite de se multiplier. Les processus biochimiques de dégradation s'accompagnent de productions de gaz. En tablant sur les quantités, la

¹ Dans l'estimation du taux de C des végétaux la relation empirique qui a été utilisée est $C = 0.496 MO - 0.891 N$ basé sur 50 données de mesure en analyse élémentaire CHN d'échantillons d'herbe (données Togo, Lecomte 1995), dans le cas de rations composites sur une relation $C = 0.259 NDF + 0.437 MPT + 0.477 ENA$ tirée de données CHN sur un ensemble de compléments alimentaires étudiées au CRAGx (non publié); dans le cas des fèces la relation utilisée est $C = 0.4537 * MO + 4.6037$ établie également sur un ensemble de références fécales CHN étudiées au CRAGx (non publié)

composition ainsi que la digestibilité des aliments ingérés, dans ces mêmes bilans, l'émission de gaz carbonés sous forme de CH_4 et CO_2 , calculée selon les modèles disponibles dans la littérature, (Moe et Tyrell 1980, Vermorel, 1995) porterait sur un total de C susceptible de varier entre 20 et 40 g C j⁻¹ chez le mouton et 220 et 450 g C j⁻¹ chez le bovin tropical de référence.

Au travers des différentes ressources 8 à 16 % du C ingéré seraient transformés en CO_2 et de 2.6 à 5.0 % en CH_4 . Les variations sont importantes. Cela tient à la nature de la ressource proposée à l'animal, elle oriente le profil des bactéries colonisant le rumen lesquelles diffèrent par leurs orientations substrat en amylolytiques, ou cellulolytiques, ces dernières étant les plus méthanogènes.

En moyenne générale, on peut considérer que sur l'ensemble des données expérimentales auxquelles il est fait référence (n = 218), le bilan serait de 13 (± 1.5) % de pertes carbonées gazeuses totales au départ de la ressource ingérée, la part émise sous forme de méthane étant de 4 (± 0.5) %.

Le carbone et l'azote des effluents

Selon ces même bilans alimentaires et selon les espèces animales ovins/bovin considérées, les quantités de C fécal émises quotidiennement vont respectivement de 0.09 à 0.19 et de 0.70 à 1.20 kg j⁻¹. La digestion intestinale s'accompagne de productions métaboliques endogènes (cellules épithéliales, sucs digestifs), ainsi, tout en digérant les fractions utilisables de l'azote alimentaire et microbien, l'animal enrichit en azote la fraction carbone non digestible et ce d'autant plus que le C/N de l'ingéré est élevé (figure 4). En fonction de la teneur en azote des fèces les rapports C/N sont susceptibles de varier entre 13 et 45. Lorsque l'on y ajoute le C et le N résultant des pertes métaboliques et émis dans les urines², le C/N global des effluents diminue et s'étend sur une plage de valeurs allant de 11 à 35. (m = 20). Le C/N diminue ainsi de 1 à 6 points selon les types d'aliments et les rations alimentaires considérés.

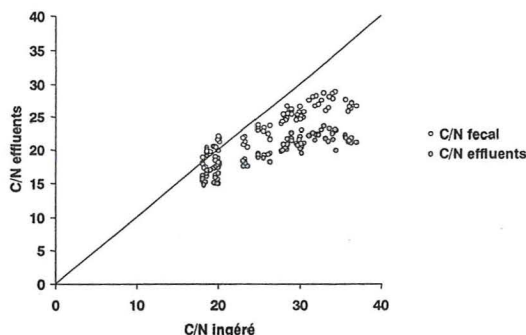


Figure 4. Relation entre le C/N de l'ingéré, le C/N des fèces et le C/N de l'effluent associant les pertes métaboliques totales (d'après les données digestibilité fourrages Guadeloupe).

Ainsi, au travers de l'ensemble des données de digestibilité prises ici en considération, c'est en moyenne 45 (± 9.0) % du C ingéré qui sera excrété sous forme de fèces.

De même en proportion de l'azote ingéré, 43 (± 11) % sera excrété sous forme fécale, cette proportion passant à 53 (± 12) lorsque l'on y inclut les pertes métaboliques quotidiennes.

² L'azote lié aux pertes quotidiennes dues au turnover des protéines et aux pertes par les poils et les phanères équivaut à 0.12 g par kg de poids métabolique et par jour (INRA, 1978). A cela doivent s'ajouter les pertes liées au rendement de l'élaboration des protéines du gain de croît (0.5 - 0.6) qui n'était pas connu ici et au recyclage de l'azote excédentaire par rapport à l'énergie dans le rumen, dans les contextes tropicaux les rations étant généralement limitées en apports d'azote elles n'ont pas été recalculées ici.

Tableau 2 Description des principaux paramètres indicateurs sur les deux séries de bilans

		Bovins 250 kg PV sur fourrages (n = 87)				Ovins 30 kg PV sur rations mixtes (n= 131)			
		Min.	Max.	Moy.	S	Min.	Max.	Moy.	S
Msing	kg j ⁻¹	4.24	6.78	5.38	0.49	0.43	0.74	0.66	0.06
Cing	kg j ⁻¹	1.843	2.786	2.298	0.186	0.163	0.331	0.268	0.030
Ning	kg j ⁻¹	0.055	0.152	0.092	0.025	0.007	0.021	0.013	0.003
Digestibilité MO	coeff.	0.53	0.74	0.64	0.04	0.38	0.70	0.55	0.07
C gaz	kg j ⁻¹	0.228	0.456	0.333	0.039	0.020	0.045	0.034	0.005
CCh4	kg j ⁻¹	0.068	0.137	0.100	0.012	0.006	0.013	0.010	0.002
C fécal	%	35.45	41.05	38.94	1.48	28.91	46.87	37.14	4.49
N fécal	%	1.45	2.26	1.81	0.23	0.85	3.41	1.63	0.40
C déféqué	kg j ⁻¹	0.705	1.198	0.868	0.095	0.096	0.192	0.135	0.020
N déféqué	kg j ⁻¹	0.026	0.053	0.038	0.006	0.002	0.015	0.006	0.002
C/N fécal	coeff.	17	29	24	3.3	13	47	25	5.4
C/N total effluents	coeff.	15	24	19	2.4	11	31	19	3.2

(d'après les données Boval et al. 2003 et Guerin et al 1990)

Les données sont liées à des situations particulières et l'on pourrait de même décrire bien d'autres situations plus intensives dans bien d'autres contextes notamment, tempérés. Elles permettent néanmoins de situer les ordres de grandeur de ce qui peut être observé en milieux tropicaux. Sans entrer dans les questions d'échelle liées à la population totale de ruminants les données dénotent le poids relatif qu'il faut attribuer aux pertes gazeuses en proportion du fait que : d'une part, l'animal ruminant tire un parti limité de ressources qu'il est le seul à pouvoir valoriser pour ses besoins métaboliques d'entretien et de production et que d'autre part, il restitue au milieu une quantité importante de carbone enrichi partiellement en azote et qui pourra être réutilisée dans d'autres compartiments de l'écosystème.

EVOLUTIONS SAISONNIÈRES

Si l'on s'attache ensuite à la dimension temporelle et à la notion de troupeau exploitant des ressources variables sur un espace, les études conduites en systèmes agropastoraux sont une source d'information intéressante. Dans ces systèmes, l'animal consomme tout au long de l'année différentes ressources et son ingestion quotidienne évolue selon les disponibilités saisonnières, en végétations naturelles et en résidus de culture.

Lorsque l'on revisite les bases de données spectrales en proche infrarouge acquises sur plus de 900 échantillons de fèces collectés lors de suivis temporels de troupeaux laitiers en zone agropastorale soudanienne (Ickowicz et Mbaye, 2001), l'estimation prédite a priori des quantités et de la composition de l'ingéré et du déféqué permet d'approcher le flux alimentaire de carbone au long de l'année.

En intégrant les données à l'échelle de l'année, pour l'ensemble des 10 troupeaux suivis dans un même village, on peut observer les évolutions saisonnières simulées de la consommation et du rejet fécal de carbone (figure 5 et 6). La consommation effective annuelle de l'animal de 250 kg de poids vif approcherait ainsi un total de 692 kg C et 38 kg N an⁻¹.

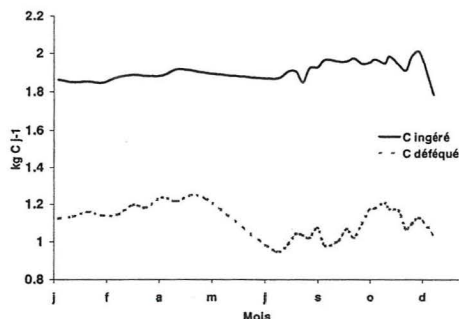


Figure 5 Evolution saisonnière des quantités de carbone ingéré et déféqué par des troupeaux laitiers en parcours agropastoraux. (d'après les données de suivi Ickowicz, 2002)

Selon l'évolution saisonnière de la digestibilité des hydrates de carbone de l'ingéré, les quantités de C déféquées quotidiennement varient de 0.9 à 1.25 kg j^{-1} . Au total sur l'année, pour un même animal de référence (250 kg PV), ce sont 400 kg de C qui seront déféqués.

La consommation d'azote, fonction de la nature des ressources, varie quotidiennement de 80 à 140 g et entraîne des excréments qui oscillent entre 45 et 65 g j^{-1} conduisant à un total annuel de 21 kg N an^{-1} .

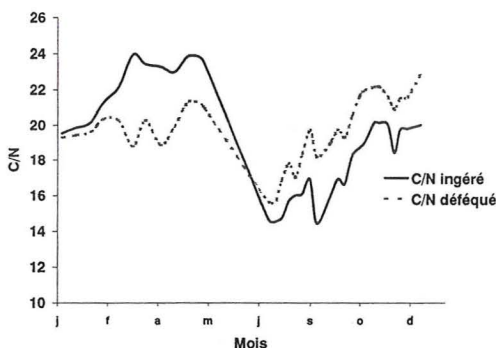


Figure 6. Evolution saisonnière des rapports C/N de l'ingéré et du déféqué pour des troupeaux s'alimentant en parcours agropastoraux (d'après les données de suivi Ickowicz, 1996)

L'évolution au cours de l'année des rapports C/N traduit par ailleurs bien, l'alternance de périodes au cours desquelles l'animal n'aura à disposition que des fourrages pauvres en azote et dont le déféqué est enrichi en N, et celles où il aura accès à une ressource plus riche en azote. Dans le cas présent il s'agissait des fanes résiduelles après culture d'arachide, elles permettent à l'animal de prélever des quantités accrues d'azote pour reconstituer ses réserves et assurer une production. Les plages de variation du C/N sont importantes, ramenés à l'année, il sont toutefois pour l'ingéré et l'effluent estimé ici à une moyenne de 19.

Ces quelques données illustrent toute la complexité temporelle des relations entre l'animal et la ressource dans ces milieux et les fonctionnalités de l'animal en termes de restitutions de carbone et azote. L'alternance de période au cours desquelles l'animal prélève et restitue de manière différenciée

met en exergue la nécessité d'aborder les interactions comme faisant partie d'un système qui évolue de façon cyclique au cours du temps.

BILAN ANNUEL DES FLUX

La prise en compte de la dimension temporelle conduit ensuite à s'intéresser à la notion d'espace et à la simulation qui pourrait être réalisée, d'un bilan global des ressources C et N et de leur utilisation annuelle à l'échelle d'un territoire d'élevage.

En restant dans un contexte de milieu chaud, un exemple de départ relativement simple à considérer et classique dans les zones tropicales, est celui de l'élevage complètement extensif de bovins à viande pâturant des repousses après feux en savanes naturelles.

Les variations saisonnières de productivité primaire, de qualité des repousses, de chargement animal potentiel, tout comme les pratiques de conduite de la ressource, alternant mise en défens et brûlis de parcelles, ont été décrites de façon détaillée sur un ranch d'élevage en zone soudano guinéenne (Lecomte, 1995). Elles permettent ici d'approcher les différents éléments d'un bilan des masses de C et N produites et transférées à l'échelle d'une surface élémentaire de parcelle.

La situation synthétique (figure 7) reprise pour établir une représentation locale est celle d'un hectare de végétation composite, reprenant différentes associations végétales dont la biomasse de repousses après feux a été simulée à partir de modèles agroclimatiques. La figure 7 décrit en le compartimentant, le devenir de la biomasse des repousses, du carbone photosynthétisé et de l'azote produits annuellement dans un contexte de sols limitant et de climat présentant 5 mois de saison sèche. Un quart de la surface est mise en réserve, le reste est progressivement brûlé pour être en partie consommé par les animaux répartis sur la surface à un taux de chargement animal qui pour maintenir l'équilibre devrait correspondre à 160 kg de poids vif sur l'hectare.

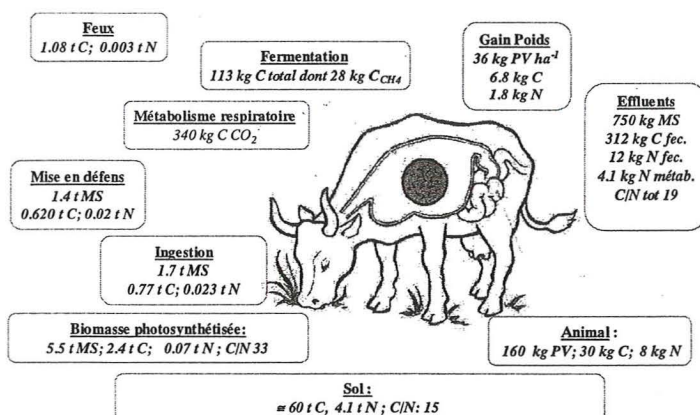


Figure 7: Ebauche de bilan annuel des flux de matière, de carbone et d'azote dans un système d'élevage extensif sur brûlis en savane soudano-guinéenne.

Les données du modèle étant rapportées à l'unité de surface, dans ce système, 30% du carbone disponible seraient consommés par les animaux et 35 % émis en CO₂ lors des feux annuels, le solde étant la biomasse résiduelle et mise en défens.

De l'ingéré annuel, 4% seraient émis sous forme de méthane, 11% sous forme de CO₂. 40% seraient restitués dans les effluents. 1% seulement est fixé dans le gain de croît à l'hectare, le reste partirait sous forme de CO₂ dans la respiration liée au métabolisme énergétique d'entretien de l'animal.

En terme d'azote, en proportion de l'ingéré, 62 % seront restitués dans les effluents et 8% fixés dans le croît moyen annuel de l'animal. Le solde correspond pour une faible part à du rejet de N gazeux au cours de la digestion (3 - 4 % du volume total de gaz produits), il est surtout attribuable au rendement de l'utilisation de l'azote dans la formation du gain de croît et au catabolisme protéique qui accompagne les pertes de poids saisonnières. Une approche plus détaillée devrait permettre de préciser ces aspects. En tout état de cause cela accroîtra d'autant la restitution d'azote dans les effluents.

A défaut de données spécifiques, le devenir du C et N des effluents après émission, tout comme les transferts dans le sol et le devenir des litières résultant de la sénescence des végétaux, n'ont pas ici été pris en compte ; ils n'en font pas moins partie de l'écosystème "de production".

Avec une productivité animale aussi limitée, et l'importante quantité de C émise dans les feux, la situation apparaît ici particulièrement extensive. En regard de la grande diversité de systèmes de conduite de l'élevage que l'on pourrait ainsi décrire en allant jusqu'à l'élevage complètement hors sol, un tel bilan, même sommaire, illustre du point de vue du carbone et de l'azote les enjeux et les questions qui se posent en termes de trajectoires d'intensification à rechercher dans le but d'optimiser non seulement la productivité mais également le bilan des éléments. L'approche explicite également la multiplicité des compartiments sur lesquels l'acteur du système pourrait intervenir pour modifier le devenir de ces éléments.

INCIDENCE DE L'AMELIORATION DES PRAIRIES

Si l'on s'entend généralement sur l'effet bénéfique de la forêt dans le stockage du carbone, les milieux prairiaux, qui couvrent plus d'un tiers des superficies émergées et participeraient à près d'un tiers des réserves en carbone de la planète, apparaissent de plus en plus comme un élément à prendre en compte dans la comptabilisation des puits de carbone.

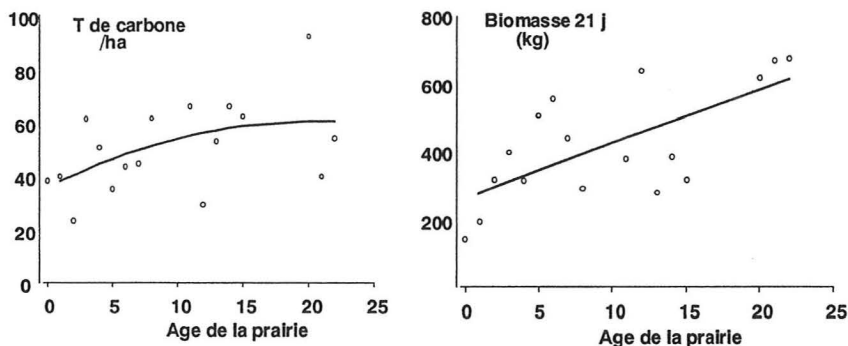
En relation avec la notion d'intensification, le développement de l'activité d'élevage, conduit dans nombre de situations, à modifier la potentialité en biomasse de l'écosystème naturel en implantant et pérennisant des prairies améliorées par l'introduction d'espèces exotiques.

Au delà de l'intérêt productif qui permet d'accroître les charges animales et au delà du fait que l'on apporte à l'animal une ressource de meilleure qualité, ce qui aura des effets sur les rendements de l'utilisation du C par l'animal: l'incidence à long terme de ces implantations sur le compartiment sol, est également un facteur à prendre en compte dans l'approche de l'impact du système d'élevage sur le devenir du carbone.

Dans la comparaison des teneurs en C dans un sol sous savane ou sous prairie cultivée en Colombie (CIAT) Fisher et al, 1994 montrent après quelques années une augmentation de la masse de C de 13% pour l'implantation d'une graminée seule et de 27 à 35 % pour l'implantation de mélanges graminées légumineuses. A l'image de ce qui est ainsi décrit, la caractérisation des taux d'humus et de carbone de sols enherbés et le suivi de chronoséquences longues met en évidence l'effet positif d'une amélioration prairiale.

En Guyane, dans une situation de sols podzoliques sableux particulièrement pauvres, supportant des végétations naturelles à faible biomasse ($\approx 1 \text{ t ha}^{-1}$), l'implantation de *Brachiaria humidicola* permet de supprimer la conduite par le feu et amène progressivement à des chargements animaux de l'ordre de 500 - 800 kg à l'ha.

En caractérisant la végétation et les sols sous de telles prairies améliorées et pâturées et pour des âges d'implantation allant de 0 à 20 ans, les données collectées par Huguenin (1997), permettent de montrer une tendance à l'accumulation de C à raison de $1.5 \pm 0.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Par ailleurs, l'amélioration des paramètres physico chimiques du sol résultant de la restauration d'une vie biologique dans le sol et de la reconstitution d'un stock de MO carbonées par l'importante biomasse racinaire du *Brachiaria*, permet ainsi plus du doublement de la productivité instantanée de l'espèce implantée après 10 ans.



Figures 8 – 9 Evolution au cours du temps de la masse de carbone dans le sol et de la productivité de l'herbe dans des prairies implantées en *Brachiaria* en Guyane (d'après Huguenin, 1997)

Implicitement, sur le long terme, l'intensification de la ressource pourrait ainsi être interprétée comme une stratégie à fonctionnalités multiples : stockage de C, amélioration de la fertilité naturelle, potentialité animale accrue, rendement d'utilisation du carbone de la ressource amélioré.

EVOLUTION DU CARBONE ET DE L'AZOTE DES EFFLUENTS

Le devenir des masses importantes de carbone et d'azote des effluents émis, constitue également un compartiment complexe dans le système de production animale voire plus globalement dans le système agricole. Les matières étant hautement fermentescibles, si elles ne sont pas incorporées au sol dans un délai rapide ou à défaut stockées, elles seront très rapidement minéralisées par la microflore ambiante. Une majeure partie sera volatilisée en CO_2 et NO_x , le recyclage dans l'écosystème sol plante étant limité pour ce qui est du C et principalement de nature azotée du fait de la microflore qui s'est développée et retourne au sol.

Dans les systèmes qui peuvent être liés à des degrés divers à l'agriculture, les effluents émis par l'animal sont le plus souvent incorporées à des pailles ou autres sous produits mis en litière pour les animaux. Ces pratiques aboutissent à la production de fumiers riches en carbone et en azote hautement fermentescible (ammoniac) dont le C/N est relevé à des valeurs de 20 à 25 . Cette fermentescibilité accrue des fumiers peut être mise à profit dans le traitement des effluents pour fixer et concentrer l'azote, réduire les masses à transporter et limiter les nuisances.

Le stockage tout comme le traitement entraînent toutefois des pertes importantes (tableau 3). On peut illustrer l'ordre de grandeur de ces pertes en observant les données tirées d'un suivi en grandeur réelle dans une exploitation d'élevage intensif en conditions tempérées. Le bilan réalisé après 6 semaines sur des fumiers stockés en tas ou mis en andains de compostage et pour partie ré-aérés après 3 semaines, montre que selon la voie et le nombre de retournements mis en œuvre, le compostage réduit le rapport C/N à des valeurs de 15 à 13 voire moins, les pertes en masses, essentiellement par volatilisation, évoluant ici entre 36 et 54 % de C et de 27 à 45% pour l'N (Kessler , 1996).

Tableau 3: Devenir des éléments C et N selon le mode de stockage d'effluents de ferme.

		Fumier non traité	Andain compost	Andain ré aéré
C/N initial		20	22	25
Pertes totales en C	%	36	51	54
Pertes totales en N	%	28	32	45
Pertes en poids	%	21	35	53
C/N final		18	16	13

L'image à priori peut apparaître négative dans la mesure où plus on traite, plus les pertes augmentent. Cette évolution sera toutefois quasi identique voire plus importante, lorsque le fumier encore riche en azote ammoniacal sera éparpillé au sol. Par ailleurs, les conditions d'anaérobiose qui s'installent rapidement dans un fumier tassé sont favorables au développement de bactéries orientées vers la production de méthane, alors qu'en compostage les départs se feront essentiellement sous forme de CO₂.

L'élément positif est ici qu'en fermentant les matières en aérobiose, la captation de l'azote dégradé par les microorganismes enrichit la matière en azote stable et rend le produit plus sain du fait de la disparition des pathogènes et des semences d'adventices au cours de la montée en température du compost. Les matières, désodorisées et réduites en masses, en sont d'autant mieux réutilisables en culture ou en prairie.

Le fait de ré-aérer très régulièrement les composts sur de longues périodes comme cela se pratique le plus souvent peut apparaître comme un réel gaspillage des éléments C et N potentiellement recyclables. Les composts dits "jeunes" se révèlent au plan de la valeur fertilisante nettement plus efficaces que des composts de longue durée (Limbourg, 2001).

Le domaine du traitement des effluents et du devenir des éléments C et N est vaste. L'exemple très partiel évoque ici un compartiment du système dont la complexité trouve son origine dans la diversité des modes de conduite de l'élevage et des effluents produits et le fait qu'une gestion adaptée peut, à des degrés divers, conduire à un recyclage plus ou moins efficient des éléments C et N.

RECYCLAGE DU CARBONE ET DE L'AZOTE DES EFFLUENTS EN PRAIRIES

Sans entrer dans les systèmes associant étroitement l'agriculture en recyclage d'effluents de l'élevage et autres déchets biofermentescibles, en restant dans les systèmes animaux, l'effet à long terme de l'apport de matières organiques sur la capacité de stockage de C en prairies est également un sujet intéressant à évoquer.

La synthèse d'essais de longue durée (tableau 4) réalisés sur des prairies pâturées de moyenne altitude en conditions tempérées, (Limbourg, 2001), montre que l'apport régulier de compost a un effet globalement positif sur le bilan du C. Le compost de fumier, utilisé en amendement, à raison de 10 à 20 t ha⁻¹, ce qui correspond à 0.8 à 1.6 t de C et 50 à 100 kg de N organique ha⁻¹ an⁻¹; comparé à l'absence de fumure ou au recours à une fertilisation minérale classique dans les conditions locales, conduit après 18 ans d'essais à observer un piégeage supplémentaire de C que l'on peut estimer ici à 1 - 1.5 t ha⁻¹.an⁻¹

De même que dans l'exemple précédent l'amélioration du taux de C et des conditions physico-chimique du sol (pH, CEC) permettent une valorisation complète de l'N et des autres éléments. Si l'on ajoute l'effet fertilisant immédiat, 30 % pour ce qui est de l'azote du compost, et les arrières effets sur le long terme pour lesquels l'essai aura permis de démontrer que l'apport annuel de 10 t de compost permet de couvrir à lui seul tous les besoins NPK de la prairie pâturée. L'apport de 20 t permet de couvrir les besoins liés à une exportation d'une coupe annuelle supplémentaire de la surface pâturée à des fins de stockage hivernal de fourrage.

Tableau 4 : Effet au long terme de l'apport de compost à différentes niveaux sur les paramètres physico chimiques et le taux de Carbone d'u sol sous prairies permanentes pâturées.

Situation en 1999	pH	MO%	C%	CEC még/100g
Témoin sans fumure	5.7	6.6	3.8	14.9
10 t ha ⁻¹ an ⁻¹ depuis 1981	5.8	7.3	4.2	16.1
15 t ha ⁻¹ an ⁻¹ depuis 1981	6.1	7.8	4.5	16.7
20 t ha ⁻¹ an ⁻¹ depuis 1981	6.2	8.5	4.9	18.9
Fumure min. NPK 40/100/100 an ⁻¹	6.1	6.9	4.0	15.2

Dans un milieu prairial et dans la conduite de l'élevage, on voit là tout le sens "système" d'une démarche intégrée et raisonnée de recyclage interne à l'exploitation, ou tout en réduisant les intrants on maintient la productivité de la végétation tout en améliorant la capacité naturelle du milieu prairial à fixer du carbone et de l'azote.

On est loin des conditions de sol qui prévalent en milieux tropicaux, mais on perçoit implicitement l'effet d'une couverture permanente du sol par les graminées et d'une conduite adaptée de recyclage de MO. Cela évoque également tout l'intérêt de ces systèmes innovants de culture sans labour associant la mise en culture de graminées et de légumineuses dont on maîtrise le couvert par l'animal, et dans lesquels on introduit d'autres cultures, en atténuant la vigueur de repousse du couvert et en évitant de détruire complètement le capital de fertilité installé par la prairie.

DISCUSSION

Ces exemples fixent des ordres de grandeur et montrent dans le système lié à l'animal les étapes au cours desquelles, les matrices complexes dans lesquelles sont inclus les éléments C et N subissent des transformations à des degrés divers.

L'évocation successive des différents compartiments ne permet pas en tant que tel de fermer un cycle complet du C à l'échelle de l'écosystème, ni de démontrer un bilan globalement positif ou à l'inverse complètement négatif de la présence de l'animal. Ce n'était pas l'objectif recherché. Elle montre par contre, tout l'intérêt d'une approche intégrée et les nombreux points sur lesquels, l'éleveur peut intervenir au travers de l'animal et de la conduite de son système pour améliorer l'efficacité des émissions C et N sous différentes formes, contribuer à la séquestration du C, limiter directement ou indirectement la dégradation de la fertilité des sols, voire l'améliorer.

Dans les milieux naturels tropicaux, le ruminant a une fonction écologique certaine. Généralement alimenté en fourrages pauvres, il améliore le carbone de la matière organique dont il ne tire pas parti en l'enrichissant en azote. Il détient également un rôle de tampon en stockant et en restituant périodiquement de l'azote dans les phases de pertes de poids et de croissance compensatrice qui s'enchaînent selon les saisons.

Vis à vis de ces mêmes milieux, l'élevage et l'intensification des systèmes, trop souvent perçu actuellement comme des facteurs défavorables à l'environnement, pourraient au contraire avoir des effets à connotation "durable".

En regard par exemple de la production de méthane et à l'opposé des systèmes pratiqués dans les pays du Nord où les rations alimentaires du bétail font un recours important aux compléments riches en amidon de céréales et au maïs, l'équation de Moe et Tyrrell (1980)³ met en évidence l'effet globalement plus méthanogène du kg d'aliment ingéré par les ruminants en régions tropicales. Les ressources auxquelles ils ont accès sont en effet fortement celluloseuses. Sur base de ce constat et des

³ L'équation établie par Moe et Tyrrell (1980) explicite cet effet de la façon suivante: production de méthane (l j⁻¹ kg⁻¹ de produit ingéré) = 86.1+12.9×Amidon+43.9×Hémicellulose+67.0×Cellulose (n= 404 r²=0.67, et r= 65). A quantités équivalentes, les coefficients sont 3 fois plus élevés dans le cas des hémicelluloses et 5 fois plus élevés dans le cas de la cellulose que celui de l'amidon.

effectifs présents au Sud, Leng (1990) attribuerait ainsi au bétail tropical près de 75 % de la production de méthane due aux ruminants.

Le niveau de production de l'animal influence également la production de méthane. Par exemple, un bovin de 600 kg produisant 40 kg de lait en ingérant de grandes quantités d'aliments hautement digestibles et donc fermentescibles, produit quotidiennement jusqu'à 700 litres de méthane par jour alors que l'animal en fin de lactation consommant des quantités limitées de foin n'en produit que 300. Sa production laitière est toutefois négligeable et rapportée au kg de produit, la proportion émise est nettement plus importante. Bien au delà des technologies peu accessibles aux éleveurs du sud qui consisteraient par exemple à modifier la flore du rumen en apportant des additifs ou en vaccinant les animaux, l'enjeu résiderait surtout dans l'amélioration des conditions alimentaires et partant de la productivité de l'animal. L'apport de fourrages de meilleure qualité, l'utilisation de sous produits agricoles ou de céréales permettrait de réduire la production de CH_4 par kg de matière ingérée.

D'autre part, l'amélioration de la productivité du troupeau qui en découle se traduira en termes de réduction de la durée de croissance et d'entretien des individus jusqu'à l'âge adulte, et surtout de diminution des effectifs à entretenir pour réaliser une production de troupeau donnée. Cela contribuerait globalement à améliorer le bilan des émissions gazeuses de carbone. On estime ainsi par exemple dans les systèmes du Nord (Sauvant, 1993), que pour une production annuelle totale de 240 tonnes de lait, 60 vaches à 4000 litres émettent 9200 m^3 de C_{CH_4} alors que 24 vaches d'un niveau équivalent à 10 000 litres ramèneraient le niveau d'émission à 4900 m^3 du fait de l'amélioration des rations à mettre en oeuvre et de la diminution du coût « méthane » lié à l'entretien de base des animaux.

En regard des recommandations qui tendent à lier les productions animales au sol et aux ressources fourragères naturelles qu'il supporte et à limiter la concurrence sur les céréales, dans le cas des ruminants, le paradoxe est bien ici que plus les animaux sont liés à l'herbe et consomment de ce fait une part plus grande de cellulose, plus on est susceptible de produire du méthane.

C'est bien la situation que l'on retrouve dans les régions tropicales où l'on valorise essentiellement des ressources pauvres, avec des animaux en grand nombre, et pour lesquels la productivité est limitée. Du fait des potentialités des races locales et de la nature des ressources utilisables, les niveaux de production évoqués plus haut ne sont toutefois pas directement adaptables aux conditions des pays tropicaux. Ils ne sont par ailleurs, certainement pas le modèle unique à rechercher.

En marge des vastes zones à vocation essentiellement pastorales dans lesquelles la conduite raisonnée et extensive de l'animal contribue à l'équilibre naturel du milieu, dans les contextes où l'activité agricole est possible, les différents exemples traduisent tout l'effet bénéfique que l'on peut retirer d'une amélioration du potentiel des animaux et d'une association plus étroite de l'élevage à l'agriculture.

Le bénéfice ne peut qu'être mutuel tant les conclusions en terme de bilan de carbone ne doivent pas s'arrêter simplement à l'effet de l'animal transformateur. Pour produire, l'éleveur gère un ensemble de ressources fourragères, les modes de conduite de la ressource ont à l'évidence une incidence notoire sur le bilan de carbone du sol. L'implantation de prairies permanentes ou de jachères courtes ou longues, l'association de graminées et légumineuses, les techniques d'implantation sans labour, l'apport de fertilisants organiques, sont autant d'éléments qui favorisent le stockage de C et la reconstitution et l'amélioration du potentiel de fertilité du sol.

CONCLUSIONS

Les voies classiques d'intensification, par simplification technique et dans un objectif de maximisation rapide, ont d'une manière générale abouti à dissocier complètement la conception de la conduite des activités d'élevage et de culture. A l'opposé, et en relation étroite avec toute la problématique du stockage du carbone, dans les milieux à fortes contraintes du sud, la mise en synergie des deux systèmes et le développement concomitant d'améliorations utiles pour l'un et l'autre serait une voie intéressante à revisiter.

La conduite d'herbages selon des modalités d'exploitation raisonnées spécifiquement de façon à pouvoir les associer étroitement à des itinéraires techniques de culture sur couvertures, tirant parti tout en les conservant des améliorations de fertilité produites dans le système herbager peuvent être particulièrement innovants. Dans le milieu des petites exploitations, l'association de l'animal peut être un facteur fort d'adoption de telles techniques culturales, sur lesquelles les agronomes du Cirad détiennent une large expérience. Ces systèmes sont cependant particulièrement complexes en terme d'adaptation technique et de conduite à la fois de l'animal et des couverts de culture tout comme dans l'établissement de relations de partenariat entre les milieux traditionnels d'éleveurs et d'agriculteurs. L'approche nécessiterait un rapprochement et une intégration plus grande des disciplines qui traitent de la culture, de l'animal et de l'implication des acteurs dans la conduite des systèmes.

Face à la croissance forte des productions de lait et de viande qui se profile dans les pays du sud, et à la nécessité d'en concevoir le développement selon des modalités durables, il apparaît qu'un important travail d'étude mériterait d'être poursuivi sur la diversité des pratiques de conduite du carbone et de l'azote dans les systèmes et sur la représentation de la complexité et des synergies qui découleraient d'une intégration accrue. La simulation en modélisation dynamique des effets et impacts potentiels d'une évolution des trajectoires de conduite des systèmes permettrait d'avancer plus rapidement sur toutes ces questions.

Bibliographie

- Boval M., Lecomte Ph., Decruyenaere V., Xandé A., 2003 Faecal Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS) to assess chemical composition, digestibility and intake of tropical fresh grass by Creole cattle. *An. Feed Sci. & Tech.*, submitted.
- Decruyenaere V., Dardenne P., Parache P., Lecomte Ph., 2000 Dégradabilité ruminale du carbone (C) et de l'azote (N) des aliments. Méthodologie d'étude intégrant la fermentation in batch et la spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR). *Rencontres Recherches ruminants*, Paris, 3-4 décembre, p. 145
- Guerin H., 1996. Valeur alimentaire des fourrages ligneux consommés par les ruminants en Afrique centrale et occidentale. In : CTA., *Deuxième programme science et technique au service du développement. Sous-programme : agriculture tropicale et subtropicale. Projets de recherche 1987-1991. Vol.3 : résumés des rapports finaux*. Wageningen, Pays-Bas, CTA, p. 187-190.
- Guerin H., Friot D., Mbaye N., Richard D., 1991. Alimentation des ruminants domestiques sur pâturages naturels sahéliens et sahélo-soudanais. Etude méthodologique dans la région du Ferlo au Sénégal. - 2. ed..Maisons-Alfort, France, CIRAD-IEMVT, n. 39, 115 p. *Etudes et Synthèses de l'IEMVT*.
- Guerin H., Richard D., Duché A., Lefèvre P., 1990. Composition chimique des fèces de bovins d'ovins et de caprins exploitant des parcours naturels ou agropastoraux sahélo soudanais : utilisation pour estimer la valeur de leur régime. *Reprod Nutr. Dev. suppl.* 2, pp. 167s-168s.
- Huguenin J., 1997. Incidences des pratiques agricoles et des caractéristiques du milieu sur l'état des prairies guyanaises - Facteurs explicatifs de la dégradation ou du maintien du couvert herbacé fourrager implanté. Mémoire de DEA ETES - Agriculture - Élevage, Université d'Orléans, MHN, INA-PG, Cirad-EMVT, 131 p.

- Ickowicz A., Mbaye M., 2001. Forêt soudannienne et alimentation des bovins au Sénégal: potentiel et limites. Bois et forêts des tropiques. 270. p. 47-61.
- INRA, 1978. Institut National de la Recherche Agronomique. *Alimentation des ruminants*. Versailles, INRA publications, Jarrige R. (Ed.), 597 p.
- INRA, Institut National de la Recherche Agronomique. (1989). *Ruminant nutrition: recommended allowances and feed tables*. Versailles, INRA publications, Jarrige R. (Ed.), 389 p.
- Kessler J.F. 1996. Compostage du fumier, Effet de l'aération d'un tas de compost sur la température, sur l'évolution du rapport carbone azote et sur les pertes en matière sèche. ISPA St Quentin, Ciney, 84 p.
- Lecomte P, Ickowicz A., 2000. Intérêt de l'application de la technique SPIR à l'analyse des matières fécales dans l'étude des régimes des ruminants sur parcours. Séminaire International sur l'Alimentation, la Santé et la Productivité des Ruminants dans les Systèmes d'Élevage Ruraux d'Afrique Sahélienne et Soudanienne, Dakar (Sénégal), 24-27 octobre 2000
- Lecomte Ph., 1995. Gestion intégrée des ressources fourragères naturelles et de l'élevage bovin dans la savane guinéenne de basse altitude. (Thèse de doctorat) Gembloux, Faculté universitaire des Sciences agronomiques. 130 tableaux, 101 figures, 317 p. + annexes.
- Leng RA, 1990. Contribution of methane from ruminants to global methane production and some strategies for reducing emissions from ruminants. Bureau of rural resources, Rep N° R/03/90 dept of primary industries and energy, Canberra, pp 31 – 40.
- Limbourg P., 2001. Phytotechnie de la prairie permanente répondant aux nouvelles exigences écologiques et économiques. Centre de recherche sur l'élevage et les productions fourragères en Haute Belgique, (2) prairies permanentes. Rapport final. CRA, Gembloux, 85 p.
- Richard D., Guerin H., Fall S.T., 1989. Feeds of the dry tropics (Sénégal) - Chapter 16 In : *Ruminant nutrition. Recommended allowances and feed tables*. Jarrige R. éd. Paris - INRA, London – John Libbey Eurotext, p.325-346.
- Vermorel M., 1995 Productions gazeuses et thermiques résultant des fermentations digestives, in nutrition des ruminants domestiques: ingestion et digestion. éd. Jarrige R. et al, Inra , pp. 649 - 670.
- Xandé A., Garcia-Trujillo R., Caceres O. 1989 Feeds of the humid tropics - Chapter 17 In *Ruminant nutrition. Recommended allowances and feed tables*. Jarrige R. éd. Paris - INRA, London – John Libbey Eurotext, p. 347-364.
- Moe P.W. and Tyrrell H.F. , 1980. Methane production in dairy cows. In: Mount (ed.), *Energy metabolism*, 59-62, EAAP publications, Butterworths, London.